

STERN-GERLACH-MEDAILLE

Die Dimension macht den Unterschied

Niedrigdimensionale Halbleiterstrukturen sind die Basis für viele neue Effekte und wichtige Bauelemente.

Gerhard Abstreiter

Die Entwicklung neuer Methoden zum Abscheiden von Halbleiterschichten ermöglichte es in den vergangenen vierzig Jahren, die elektronischen und optischen Eigenschaften von Halbleiterstrukturen zu variieren und die elektronischen Bandstrukturen und Bandverläufe „maßzuschneidern“. Während zunächst zweidimensionale Schichtsysteme untersucht wurden, rückten bald eindimensionale Drähte und nulldimensionale Quantenpunkte ins Zentrum des Interesses. Im Lauf der Jahre gelang es auf der Grundlage von niedrigdimensionalen Halbleitersystemen, eine Vielzahl neuer physikalischer Effekte zu entdecken und unterschiedlichste Bauelemente für vielfältige Anwendungen zu entwickeln.

Ein ersten großen Höhepunkt erlebte die Physik niedrigdimensionaler, insbesondere quasi-zweidimensionaler Elektronensysteme in den 1970er-Jahren. Dieser beruhte auf der Entwicklung von Si-MOS-Transistoren und den dafür notwendigen sehr guten Si/SiO₂-Grenzflächen. Eine an MOS-Kondensatoren angelegte Gate-Spannung erlaubt es, an der Grenzfläche zwischen dem Halbleiter (Si) und dem Isolator (SiO₂) frei bewegliche Elektronen zu induzieren. Dies setzt eine geringe Dichte von Zuständen an der Grenzfläche voraus, welche die Elektronen „einfangen“ können (Trap-Zustände). Die Elektronendichte, und damit einhergehend die Fermi-Energie, lassen sich mit der angelegten Gate-Spannung kontinuierlich variieren. Da sich die Elektronen senkrecht zur Grenzfläche aufgrund der Raumladungszone im Halbleiter sowie der Barriere zum Isolator nur eingeschränkt bewegen können, hat das Elektronensystem einen quasi-zweidimensionalen Charakter. Entlang der Grenzfläche bleiben die Ladungsträger frei beweglich, sodass sich elektrische Subbänder ausbilden, mit quantisierten Niveaus senkrecht zur Grenzfläche (Abb. 1).

Ebenfalls seit den 1970er-Jahren lässt sich die elektronische Subbandstruktur berechnen, basierend auf einer selbstkonsistenten Lösung der Schrödinger- und Poisson-Gleichung in der Näherung effektiver Massen und auch unter Einbeziehung von Vielteilcheneffekten wie Austausch und Korrelation. Die Schrödinger-Gleichung wird dabei für Bewegungen senkrecht und parallel zur Grenzfläche separiert. Die vielen grundlegenden Arbeiten zu den unterschiedlichsten Eigenschaften von solchen quasi-zweidimensionalen



Diese Molekularstrahl-Epitaxieanlage (MBE) wurde Mitte der 1990er-Jahre am Walter Schottky Institut installiert. Sie ist mit Ga, Al, In, As, Si und C bestückt und dient der Herstellung von Vielschicht-

systemen, selbst-assemblierten Quantenpunkten und Halbleiter-Nanodrähten. Daraus sind mehr als 500 Veröffentlichungen teils mit unterschiedlichen Arbeitsgruppen weltweit hervorgegangen.

Ladungsträgersystemen haben Ando, Fowler und Stern 1982 in einem ausführlichen Übersichtsartikel mit umfangreichen Literaturangaben zusammengefasst [1]. Besonders interessante Ergebnisse ergaben sich mit einem starken Magnetfeld senkrecht zur zweidimensionalen Grenzfläche. Das quasi-zweidimensionale Elektronengas wird dadurch vollständig quantisiert, da das senkrechte Magnetfeld die Elektronen auf Zyklotronbahnen zwingt bzw. in Landau-Niveaus quantisiert. Die elektronische Zustandsdichte wird

KOMPAKT

- Die Molekularstrahlepitaxie erlaubt es, dünne Schichten mit nahezu atomarer Präzision abzuschneiden, insbesondere von III-V-Verbindungshalbleitern wie GaAs, InAs, GaN, InP und Legierungen daraus.
- Mit der sog. Vapor-Liquid-Solid-Methode lassen sich Anordnungen von Nanodrähten erzeugen. In Halbleiterkombinationen mit unterschiedlichen Gitterkonstanten können spontan Nanoinseln („Quantenpunkte“) entstehen.
- Die reduzierte Dimension dieser Systeme verändert die elektronische Zustandsdichte und damit auch die elektronischen und optischen Eigenschaften drastisch. Daraus ergibt sich ein großes Potenzial für Anwendungen.

Prof. Dr. Gerhard Abstreiter, Institute for Advanced Study and Walter Schottky Institut, Physik-Department, TU München, 85748 Garching – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung der Stern-Gerlach-Medaille 2014 auf der DPG-Jahrestagung in Berlin

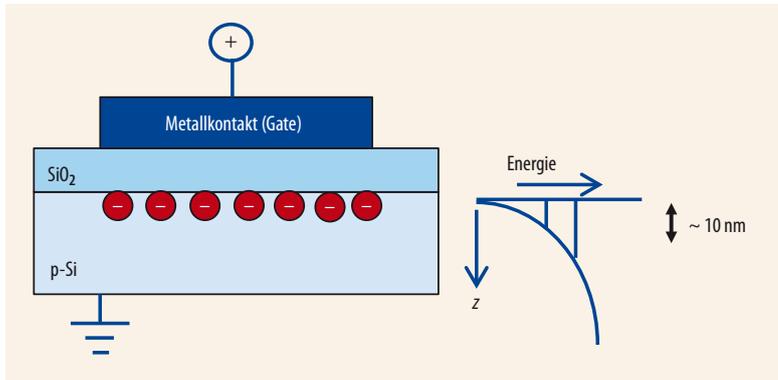


Abb. 1 Bei einem Metall-Oxid-Halbleiter-Kondensator (MOS) werden durch Anlegen einer positiven Spannung an das Gate Elektronen (die Minoritätsträger im p-dotierten Silizium) an die Si-SiO₂-Grenzfläche gebunden. Senkrecht zur Grenzfläche bildet sich durch den Bandverlauf des Leitungsbandes im Halbleiter und die Barriere zum SiO₂ ein

eindimensionaler Potentialtopf mit quantisierten Subbändern für die Elektronen (rechts), die parallel zur Grenzfläche frei beweglich sind. Solche quasi-zweidimensionalen Elektronensysteme lassen sich auch in Halbleiter-Heterostrukturen realisieren und sind Basis für grundlegende physikalische Effekte und neue Bauelemente.

dadurch diskret. Experimente zu Shubnikov-de-Haas-Oszillationen und zur Zyklotronresonanz [2] lieferten wertvolle Informationen über Eigenschaften der Ladungsträger wie effektive Massen, effektive g-Faktoren, Streumechanismen und vieles mehr. Der Höhepunkt der damaligen Arbeiten war zweifellos die Entdeckung des Quanten-Hall-Effektes in Si-MOS-Transistoren durch Klaus von Klitzing Anfang 1980 [3] (Nobelpreis 1985). Diese fundamentale Entdeckung löste einen enormen Boom aus. In der Folge entstanden unzählige experimentelle und theoretische Arbeiten, ein neues großes Forschungsgebiet war geboren.

Heterostrukturen und Vielschichtsysteme

Parallel zu den auf Si-MOS-Systemen basierenden Aktivitäten entwickelte sich in den 1970er-Jahren aber auch ein anderes neues Arbeitsgebiet, das auf der Möglichkeit beruhte, Halbleiter-Heterostrukturen und künstliche Übergitter herzustellen. Neue Epitaxie-Methoden, insbesondere die Molekularstrahlepitaxie (MBE), kamen Ende der 1960er-Jahre hinzu und erlaubten es, Nanometer-dünne kristalline Filme mit nahezu atomarer Präzision abzuschneiden (Abb. auf S. 29) [4]. Damit war es möglich, kristalline Heterogrenzflächen und Vielschichtsysteme aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien mit hoher Perfektion herzustellen. Die elektronischen und optischen Eigenschaften solcher „künstlicher“ Kristalle lassen sich in weiten Bereichen variieren und nach Wunsch einstellen. Der Begriff „bandstructure engineering“ wurde eingeführt, eine frühe Version dessen, was heute im Zusammenhang mit der Nanotechnologie als „atomic-scale materials design“ wieder sehr modern geworden ist.

Da die verwendeten Halbleiter unterschiedliche Energielücken haben, treten an den Grenzflächen Banddiskontinuitäten auf, die im Wesentlichen die elektronischen und optischen Eigenschaften von Hetero- und Vielschichtstrukturen festlegen. Diese „band-offsets“ für verschiedene Halbleitersysteme zu bestimmen war ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt in dieser Zeit. Dabei kamen überwiegend III-V-Halbleiter zum Einsatz (Abb. 2). Am intensivsten untersucht wurde die Kombination von GaAs, AlAs und der ternären Legierung Al_xGa_{1-x}As, wobei *x* den Anteil an Al-Atomen angibt, mit denen Ga-Atome im Kristall statistisch ersetzt wurden. GaAs und AlAs kristallisieren in der Zinkblendestruktur mit nahezu gleichen Gitterkonstanten. Deshalb sind diese beiden Materialien ideal

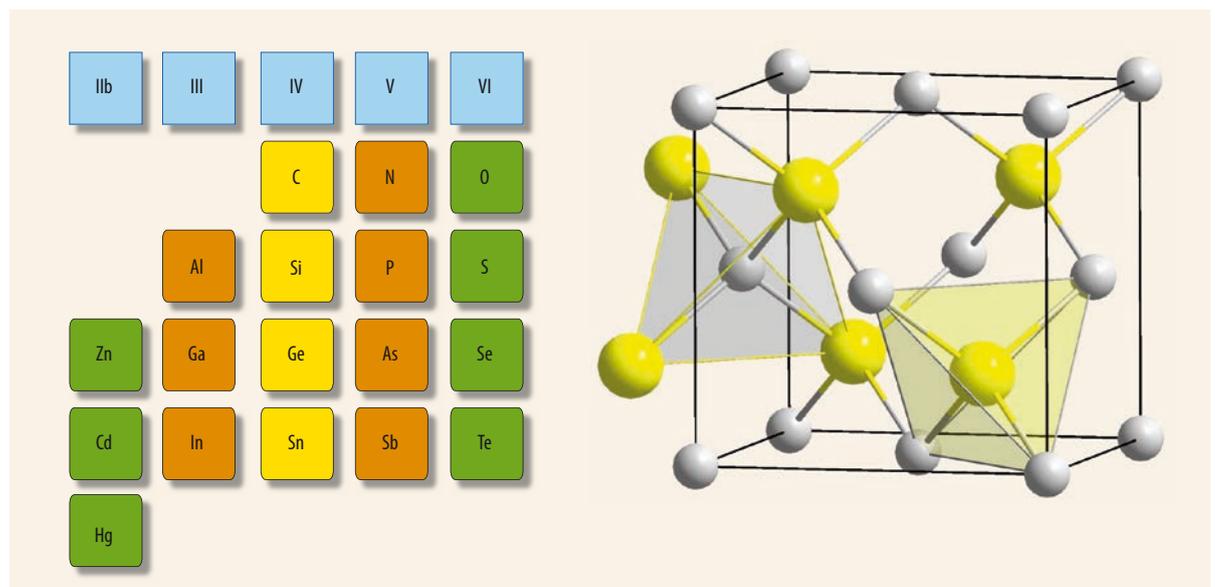


Abb. 2 Neben den Elementhalbleitern Si und Ge aus der Gruppe IV sind insbesondere die Verbindungshalbleiter aus den Gruppen III und V wie GaAs, InAs, InP oder GaN und Legierungen daraus, aber auch II-VI-Halbleiter wie ZnS, CdS oder CdTe für unterschiedlichste Anwendungen von besonderer

Bedeutung. Die meisten dieser Halbleiter kristallisieren in der Zinkblendestruktur (rechts), Si und Ge in der Diamant-, einige wenige wie GaN in der Wurtzitstruktur. Kombinationen unterschiedlicher Materialien bilden die Basis für Halbleiter-Hetero- und -Vielschichtstrukturen.

für atomar gewachsene Schichtsysteme mithilfe der sog. Heteroepitaxie, da auch bei einer großen Zahl an Schichten kaum Verspannungen auftreten. Mit diesem Materialsystem wurden viele grundlegende Experimente durchgeführt und neuartige Bauelemente entwickelt wie z. B. ein Quantenkaskaden-Laser (Abb. 3).

In $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ wächst die Bandlücke kontinuierlich mit zunehmendem x . Die Differenz zur Bandlücke von GaAs verteilt sich zu ca. zwei Drittel auf das Leitungs- und zu einem Drittel auf das Valenzband (für $x < 0,4$). So bildet sich z. B. an der Grenzfläche zwischen GaAs und $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ eine Barriere für Elektronen im Leitungsband von etwa 200 meV und für Löcher im Valenzband von etwa 100 meV, da die Legierung mit $x = 0,25$ eine um etwa 300 meV höhere Energielücke als GaAs besitzt. Bei einer dünnen Schicht GaAs (typisch 10 nm) eingebettet in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ entstehen somit rechteckige Potentialtöpfe mit endlicher Tiefe für Elektronen im Leitungs- bzw. Löcher im Valenzband (eindimensionaler Quantenfilm oder *quantum well*). Die Zustände in diesen Potentialtöpfen sind quantisiert (Infokasten). In periodischen Abfolgen solcher wenige Nanometer dünnen Einzelschichten (Übergitter) koppeln diese Zustände aufgrund der endlichen Tunnelwahrscheinlichkeit der Ladungsträger durch die Barrieren; die Folge sind so genannte Minibänder.

In den 1970er-Jahren führten Leo Esaki (Nobelpreis 1973) und seine Gruppe bei IBM in Yorktown Heights Pionierarbeiten zu Miniband-Transport und resonantem Tunneln durch [5]. Etwa zur gleichen Zeit veröffentlichten Ray Dingle und Mitarbeiter bei den Bell Laboratorien erste Untersuchungen zu optischen Interbandübergängen in GaAs-Quantenfilm-Strukturen [6]. Ein wichtiger weiterer Schritt für die flexible Nutzung von Heterostrukturen und Quantenfilmen war die Modulationsdotierung [7] bzw. die selektive Dotierung in Einzelheterostrukturen [8]. Die räumliche Trennung der Ladungsträger von den ionisierten Störstellen und die nahezu perfekten kristallinen Grenzflächen ermöglichten sehr hohe Elektronenbeweglichkeiten. Diese waren entscheidend für die Entdeckung des fraktionalen Quanten-Hall-Effektes durch Tsui, Störmer und Gossard im Jahr 1982 [9] (Nobelpreis für Tsui und Störmer sowie Laughlin (Theorie) im Jahr 1998).

Durch bessere Epitaxiebedingungen sowie optimierte Schichtfolgen lassen sich heute in einigen wenigen Anlagen auf der Welt Proben mit Elektronenbeweglichkeiten von mehr als $10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ bei tiefen Temperaturen herstellen. Eine solche MBE-Anlage entstand in den 1990er-Jahren auch am Walter Schottky Institut in Garching (Abb. auf S. 29). Bezüglich der optischen Eigenschaften und optoelektronischen Anwendungen gewannen insbesondere Quantenfilme an Bedeutung, da die atomare Kontrolle der Schichtdicke es erlaubt, die Energielücke präzise einzustellen – ein weiteres Beispiel für „bandstructure engineering“.

Das Arbeitsgebiet der Heterostrukturen, der eindimensionalen Quantenfilme und der Übergitter erlebte einen ungeahnten Boom mit einer schier unüberschaubaren Zahl von grundlegenden Arbeiten zu

ihren elektrischen und optischen Eigenschaften nach 1980. Dazu gehören neben den vielen Arbeiten zu den Quanten-Hall-Effekten Untersuchungen zu ballistischem Transport, resonantem Tunneln, niederenergetischen elektronischen Anregungen, Intersubbandanregungen, Interbandoptik, Quantum Confined Stark-Effekt, phononische und Spinanregungen und vieles mehr. Sog. Top-Gate-Strukturen erlaubten es ab Ende der 1980er-Jahre, die Ladungsträgerdichten in modulationsdotierten Heterostrukturen auch in der Ebene zu variieren und geometrisch beliebige laterale Barrieren aufzubauen. In sog. Punktkontakten wurde damit z. B. die Leitwertquantisierung in einer Dimension entdeckt [10]. In lateralen Quantenpunkten gelang es, die Coulomb-Blockade nachzuweisen und einzelne Ladungen und Spins zu kontrollieren. Dieses Arbeitsgebiet ist bis heute höchst aktuell und wurde auf viele Materialsysteme ausgeweitet, in den letzten zehn Jahren insbesondere auch auf Graphen. Ein wichtiges Forum für die Diskussion der neuesten Ergebnisse bieten seit 1975 die alle zwei Jahre stattfindenden Konferenzserien „Electronic Properties of Two-Dimensional Systems“ und „Modulated Semiconductor Structures“ sowie eine Vielzahl von speziellen Symposien und Workshops. Ebenso wie die breite Grundlagenforschung ist die Entwicklung von neuartigen Bauelementen ab den 1980er-Jahren geradezu explodiert. Hervorzuheben sind hier resonante Tunnelndioden, Hetero-Feldeffekt- und -Bipolar-Transistoren, Quantum-Well-Laser, Quantenkaskaden-Laser (Abb. 3), Hetero-Photodioden, Intersubband-Detektoren, optische Modulatoren, Tandem- und Triple-Hetero-Solarzellen, um nur einige Beispiele zu nennen.

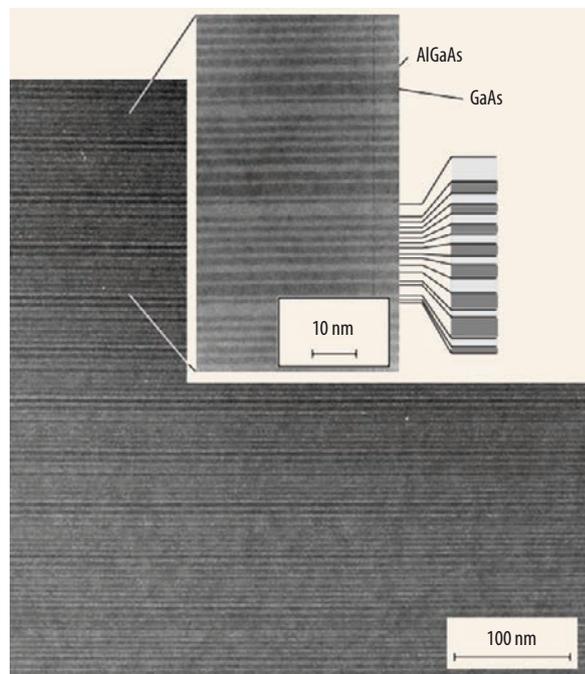


Abb. 3 Diese transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme zeigt eine periodische Folge von GaAs- und $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -Schichten mit einzelnen Dicken im Nanometerbereich. Die Schichtfolge entspricht einem Quantenkaskaden-Laser, der eine atomar genaue Dickenkontrolle über mehrere hundert Schichten erfordert.

Verspannte Systeme und selbstassemblierte Quantenpunkte

In den 1980er-Jahren gelang es, Heterostrukturen aus Halbleitern mit unterschiedlichen Gitterkonstanten zu realisieren. Die dadurch eingebauten Verspannungen ändern die Banddiskontinuitäten sowie die elektronischen und optischen Eigenschaften drastisch, bieten dadurch aber einen zusätzlichen Freiheitsgrad für gezieltes „bandstructure engineering“. Beispielhaft sind hier nur die Arbeiten zu Si/SiGe erwähnt: Wir haben bereits 1985 gezeigt, dass verspanntes Silizium stark erhöhte Elektronenbeweglichkeiten aufgrund der Aufspaltung der Leitungsbänder aufweisen kann [11] – ein in modernen CMOS-Bauelementen breit genutzter Effekt.

Wegen der zunehmenden Verspannungsenergie ist es allerdings nur bis zu einer bestimmten Dicke möglich, planare Schichten aus Halbleitermaterialien mit unterschiedlichen Gitterkonstanten epitaktisch abzuscheiden. Diese kritische Schichtdicke hängt von den Wachstumsparametern und dem Unterschied der Gitterkonstanten ab. Schichten mit eingebauten Verspannungen relaxieren, indem sie entweder Versetzungen

ausbilden oder zu dreidimensionalem Wachstum übergehen. Beispiele hierfür sind Si/Ge und InAs/GaAs. Die Energielücken von InAs und GaAs unterscheiden sich stark, die Gitterkonstanten um ca. 7 Prozent. Versucht man, planare InAs-Filme auf GaAs-Substraten abzuscheiden, so entstehen bei bestimmten Wachstumsbedingungen bereits nach ca. zwei Atomlagen dreidimensionale 10 bis 30 Nanometer große Inseln (Abb. 4), wie Goldstein et al. 1985 erstmals beobachteten [12].

Die Bedeutung solcher InAs-Inseln als Quantenpunkte wurde aber erst in den 1990er-Jahren erkannt. Für die intensiv untersuchten optischen Eigenschaften ist entscheidend, dass die Energielücke von InAs ca. 1 eV kleiner ist als die von GaAs. In GaAs eingebettete InAs-Inseln zeichnen sich deshalb durch ein tiefes Einschlusspotential für Elektronen im Leitungsband und Löcher im Valenzband aus. Ladungsträger sind in solchen Quantenpunkten in allen drei Raumrichtungen lokalisiert und besetzen diskrete quantisierte Zustände – ähnlich wie in Atomen ergibt sich eine Schalenstruktur für die Besetzungsenergien (Infokasten). So passen aufgrund des Pauli-Prinzips z. B. nur zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin

ZUSTANDSDICHTEN

Die elektronischen und optischen Eigenschaften von Halbleitersystemen sind im Wesentlichen durch die elektronischen Zustandsdichten in der Nähe der Bandkanten bestimmt. Die Zustandsdichte $D(E)$ beschreibt die Anzahl der Zustände pro Energieintervall. Für elektronische Transporteigenschaften ist insbesondere die Zustandsdichte in der Nähe der Fermi-Energie wichtig. Die optischen Eigenschaften werden wesentlich durch die sog. kombinierte Zustandsdichte bestimmt, d. h. für optische Übergänge sind die vorhandenen besetzten (Anfangs-)Zustände, z. B. im Valenzband, und die leeren (End-)Zustände, z. B. im Leitungsband, entscheidend. Die elektronischen Zustandsdichten hängen von der Dispersionsrelation (Bandstruktur) und der Dimensionalität des Systems ab. Das Valenzbandmaximum und das Leitungsbandminimum lassen sich für die meisten Halbleiter durch eine parabolische Dispersionsrelation sehr gut annähern:

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

Dabei ist m^* die effektive Masse der Ladungsträger. In einem Festkörper mit periodischer Kristallstruktur ist die Zahl der Zustände im k -Raum pro Volumen V gegeben durch:

$$\frac{N}{V} = \frac{4}{3} \pi k^3 \left(\frac{1}{2\pi}\right)^3$$

Bei parabolischer Dispersionsrelation ergibt sich mit $k = \sqrt{2m^*E}/\hbar$ für die Zustandsdichte pro Einheitsvolumen und Energie im Dreidimensionalen die bekannte \sqrt{E} -Abhängigkeit:

$$D_{3d}(E) = V^{-1} \frac{dN}{dE} = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2}\right)^{3/2} \sqrt{E - E_g}$$

Eine analoge Herleitung ergibt bei zweidimensionalen Systemen für jedes Subband eine konstante und damit insgesamt stufenförmige Zustandsdichte

$$D_{2d}(E) = \frac{1}{\pi} \frac{m^*}{\hbar^2} = \text{konst.}$$

und für eindimensionale Systeme für jedes Subband eine $1/\sqrt{E}$ -Abhängigkeit:

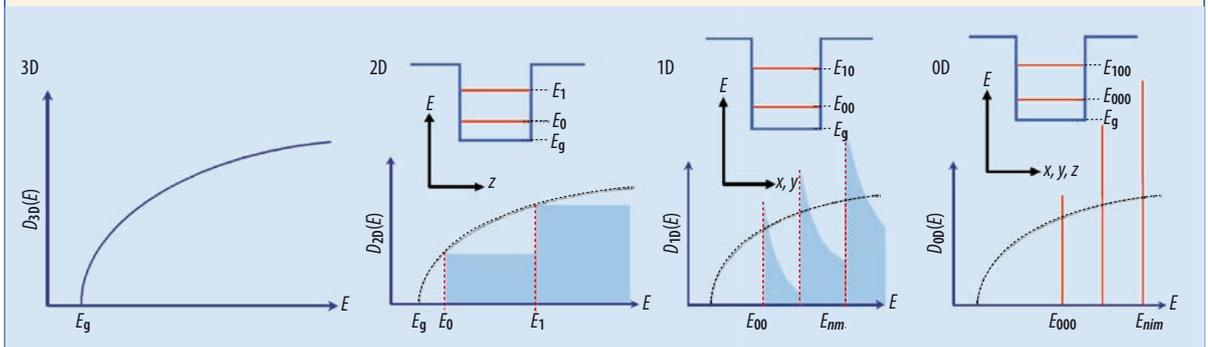
$$D_{1d}(E) = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m^*}{2\hbar^2}} \frac{1}{\sqrt{E}}$$

Nulldimensionale Systeme („Quan-

tenpunkte“) weisen ein diskretes Energiespektrum auf, unabhängig von der Dispersionsrelation des entsprechenden Volumenhalbleiters. Die Anzahl der Zustände hängt vom Entartungsgrad ab. Der elektronische Grundzustand kann aufgrund des Pauli-Prinzips immer nur mit zwei Elektronen (mit entgegengesetztem Spin) besetzt werden. Der Entartungsgrad der höheren Zustände hängt von der Symmetrie der Quantenpunkte (Geometrie, Verzerrung, piezoelektrische Felder, usw.) ab.

Viele der neuen und teilweise überraschenden physikalischen Effekte und der neuartigen Bauelemente, die mit Halbleiter-Hetero- und -Nanostrukturen in den vergangenen 40 Jahren entdeckt und erfunden wurden, basieren auf den drastischen Veränderungen der elektronischen Zustandsdichten mit der Dimensionalität des Systems.

Abb. i Zustandsdichten für parabolische Dispersionsrelation in 3, 2, 1, und 0 Dimensionen



in den Leitungsbandgrundzustand (s-Schale), sodass ein drittes Elektron die p-Schale mit höherer Energie besetzen muss. Wegen dieser diskreten Energie- und Schalenstruktur gelten solche Quantenpunkte häufig als „künstliche Atome“.

Eine unserer ersten Arbeiten, welche die diskrete Schalenstruktur im optischen Spektrum sowie die Feinstruktur bei Besetzung mit mehreren Ladungsträgern eindeutig gezeigt hat, ist an dünnen GaAs-Quantenfilmen durchgeführt worden. Die Lokalisierung der Elektron-Loch-Paare (Exzitonen) kam dabei durch Variationen der Schichtdicken zustande [13]. Diese Pionierarbeit hat bereits viele, heute wichtige Aspekte der Eigenschaften von Quantenpunkten aufgezeigt, z. B. Spin-Kontrolle durch polarisiertes Licht, sequenzieller Zerfall von Multi-Exzitonen und resonante Zwei-Photonen-Anregung von Exzitonenpaaren. Erst die Spektroskopie an einzelnen Quantenpunkten hat es ermöglicht, einzelne Exzitonen und Biexzitonen als scharfe, atomähnliche Spektrallinien zu beobachten und zu identifizieren. Hierfür waren die instrumentelle Entwicklung von konfokaler und Nahfeld-Mikroskopie und deren Verwendung für hoch-ortsauflösende Spektroskopie wesentlich.

Halbleiter-Quantenpunkte sind nicht wie Atome alle identisch, sondern fluktuieren in Größe, Form, Zusammensetzung, Verspannung und weisen als Ensemble daher große inhomogene Verbreiterungen auf. Seit nunmehr zwanzig Jahren werden Halbleiter-Quantenpunkte intensiv untersucht mit besonderem Augenmerk auf die Kontrolle, überwiegend auch kohärente Kontrolle von einzelnen Ladungen, Exzitonen, Spins und Photonen [14, 15]. Sie sind Basis für die Entwicklung von z. B. effizienten Quellen für Einzelphotonen oder verschränkte Photonen, werden aber auch als Quantenpunkt-Laser bereits kommerziell genutzt.

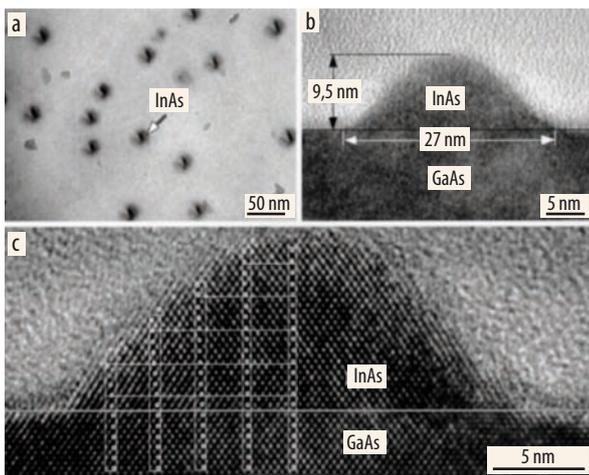


Abb. 4 Elektronenmikroskopische Aufnahmen unterschiedlicher Auflösung von selbst-assemblierten InAs-Inseln auf GaAs. Um solche Inseln als Quantenpunkte zu nutzen, werden sie durch Überwachsen, z. B. mit GaAs, vollständig in eine Halbleitermatrix eingebettet. Dabei verändern sich Form, Zusammensetzung und Verspannung der Quantenpunkte, was für die elektronischen und optischen Eigenschaften wichtig ist. Die markierten Gitterpositionen in der hochauflösenden Abbildung (c) heben die elastische Relaxation der Verspannung in der Insel hervor.

Halbleiter-Nanodrähte

Dank der direkten Synthese von Halbleiter-Nanodrähten entstand vor rund 15 Jahren ein weiteres höchst interessantes Arbeitsgebiet. Hierbei induziert ein externer Katalysator, z. B. ein winziges Goldtröpfchen auf einem Halbleitersubstrat, das Wachstum von Halbleiter-Nanodrähten. Dem flüssigen Goldtröpfchen werden aus der Gasphase z. B. Si-Atome bis zur Sättigungslöslichkeit zugeführt. An der Grenzfläche zwischen dem Substrat und dem gesättigten Katalysator scheidet sich dann kristallines Si ab, das bei weiterer Materialzufuhr als dünner Draht wächst. Den Durchmesser bestimmt typischerweise die Größe des Goldtröpfchens. Dieses bleibt am oberen Ende des Drahts und fungiert als Quelle für dessen weiteres Wachstum, sofern weiter Atome aus der Gasphase zugeführt werden. Diese Vapor-Liquid-Solid-Methode des Kristallwachstums diente bereits vor rund 50 Jahren dazu, Si-Nanowhisker herzustellen [16]. Seit Ende der 1990er-Jahre ist sie wieder sehr populär geworden, um Halbleiter-Nanodrähte für unterschiedlichste Anwendungen (z. B. Nanoelektronik, -photonik, -sensorik ...) auf verschiedenen Substraten zu realisieren. Die Zahl der einschlägigen Veröffentlichungen ist bis heute auf mehr als 1000 pro Jahr angewachsen.

Vor sechs Jahren hatten wir uns das Ziel gesteckt, höchstreine III-V-Nanodrähte aus (Ga, In, Al)As ohne externen Katalysator mithilfe der hochreinen MBE-Anlage (Abb. auf S. 29) direkt zu synthetisieren. Wachstum von GaAs- und InAs- bzw. auch $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -Nanodrähten ist auf oxidierten Halbleitersubstraten in definierten Löchern direkt und ohne externen Katalysator möglich [17]. Wegen der geringen Durchmesser der Nanodrähte (typisch 50 nm) lassen sie sich, unter bestimmten Bedingungen, auch auf Substraten mit unterschiedlicher Gitterkonstante defektfrei aufwachsen. Ein Schwer-

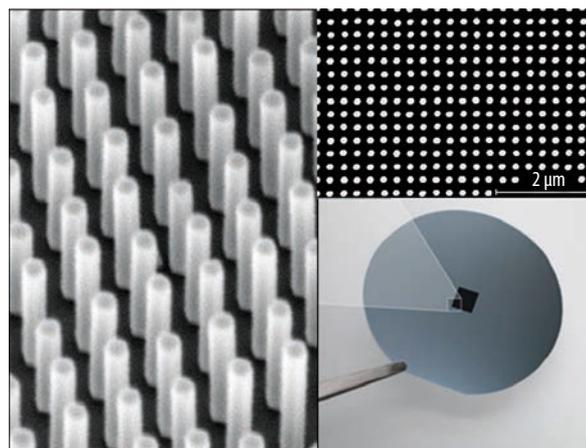


Abb. 5 Diese licht- und elektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen ein Array von InAs-Nanodrähten auf Si, hier mehr als 10^9 Nanodrähte pro cm^2 . Durch Nanoimprint-Lithographie wurden im Zentrum des oxidierten 2-Zoll-Si-Wafers an vorgegebenen Positionen Löcher durch das SiO_2 bis zum darunter liegenden Si geätzt. In diesen Löchern nukleieren in der MBE-Anlage die InAs- oder $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -Nanodrähte. Diese ermöglichen die Kombination von III-V-Halbleitern mit Si und sind vielversprechend für nano-elektronische, -photonische und -sensorische Anwendungen.

punkt unserer Arbeiten in den vergangenen Jahren bestand darin, solche III-V-Halbleiter-Nanodrähte direkt auf Si aufzuwachsen und die exakte Position z. B. durch Elektronenstrahl- oder Nanoimprint-Lithographie festzulegen. Auf diese Weise lässt sich z. B. ein Quadratzentimeter großes Array von mehr als 10^9 InAs-Nanodrähten auf einem Si-Wafer herstellen (Abb. 5) [18].

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist es, Halbleiter-Heterostrukturen in axialer und radialer Richtung in die Nanodrähte zu integrieren. Hierzu arbeiten weltweit viele Gruppen mit unterschiedlichen Ansätzen. Ziel ist dabei, funktionelle Hetero-Nanodrähte für unterschiedlichste Anwendungen, z. B. Nanoelektronik, Nanophotonik, Sensorik und Photovoltaik zu optimieren. Insbesondere sog. core-shell-Nanodrähte sind hierbei besonders interessant: Ihre Schalenstruktur erlaubt es, die Oberflächen zu passivieren und dadurch z. B. die optischen Eigenschaften drastisch zu verbessern. Gleichzeitig lassen sich damit insbesondere in radialer Richtung z. B. Hetero-pn-Übergänge einbauen. Vor kurzem gelang es uns, GaAs-core shell-Nanodrahtlaser auf Si-Substraten zu realisieren [19]. Hetero-Nanodrähte sind vielversprechend für unterschiedlichste Anwendungen, insbesondere auch in der Integration mit Silizium-CMOS-Technologie.

Danksagung

Die Beschreibung der vergangenen 40 Jahre des Forschungsgebietes „Halbleiter Hetero-, Nano- und Quantenstrukturen“ auf diesen wenigen Seiten ist eine Art Tour de Force durch ein riesiges Arbeitsgebiet. Es mussten natürlich viele höchst interessante Aspekte und Entwicklungen weggelassen werden, eine umfassende Darstellung würde mehrere Bücher füllen. Ich hatte das Glück, bereits vor 40 Jahren im Rahmen meiner Doktorarbeit, durch die ersten Messungen der Zyklotronresonanz an zweidimensionalen Elektronengasen, gemeinsam mit Fred Koch und Jörg Kotthaus an der TU München, etwas zum Verständnis von Si-MOS-Strukturen beitragen zu können. Die Halbleiterphysik hat mich seitdem nicht mehr losgelassen. In meiner Postdoc-Zeit am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart und Grenoble bei Manuel Cardona begann eine langjährige Zusammenarbeit mit Klaus Ploog bezüglich GaAs basierter Heterostrukturen. Zurück an der TU München habe ich gewissermaßen als Wanderer zwischen der Silizium- und der GaAs-Welt von einer engen Kooperation mit Erich

Kasper, Friedrich Schäffler und der gesamten Arbeitsgruppe Gruppe zu Si/SiGe, damals bei AEG, später bei Daimler in Ulm profitiert. Klaus von Klitzing hat uns vor knapp 30 Jahren großartig mit der Gründung des Walter Schottky Instituts (WSI) an der TU München unterstützt, und das Spektrum unserer Forschungsarbeiten hat sich dadurch drastisch verbreitert. Der wissenschaftliche Erfolg basiert auf vielfältigen nationalen und internationalen Kooperationen und der hervorragenden Arbeit von vielen Postdocs, Doktorand/innen, Diplomand/innen sowie den ausgezeichneten Techniker/innen und Kollegen am WSI. Ich danke allen ganz herzlich für ihr großes Engagement und möchte namentlich folgende, längerfristig in meiner Gruppe tätige Kolleg/innen der letzten 25 Jahre in etwa in zeitlicher Reihenfolge benennen: Artur Zrenner, Werner Wegscheider, Karl Brunner, Dominique Bougeard, Dieter Schuh, Matthew Grayson, Marc Tornow, Jonathan J. Finley, Ulrich Rant, Anna Fontcuberta i Morral, Dance Spirkoska, Ilario Zardo und Gregor Koblmüller. Die unterschiedlichen Projekte wurden über die Jahre von vielen lokalen, nationalen und internationalen Geldgebern gefördert. Besonders erwähnen möchte ich hier die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die uns im Rahmen von mehreren SFBs und in den letzten Jahren auch durch den Exzellenzcluster Nanosystems Initiative Munich kontinuierlich die notwendigen Drittmittel bereitgestellt hat. Ebenso wurde der Aufbau und Betrieb des Walter Schottky Instituts und des, 2010 in Betrieb gegangenen Zentrums für Nanotechnologie und Nanomaterialien durch das Land Bayern, den Bund und die TU München beispielhaft unterstützt.

Ich widme diesen Artikel meinen Mentoren Fred Koch und Manuel Cardona, die leider viel zu früh verstorben sind.

Literatur

- [1] T. Ando, A. Fowler und F. Stern, Rev. Mod. Phys **54**, 437 (1982)
- [2] G. Abstreiter et al. Phys. Rev. Lett. **32**, 85 (1974) und Phys. Rev. B **14**, 2480 (1976)
- [3] K. von Klitzing et al., Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980)
- [4] siehe z. B.: A. Y. Cho und J. R. Arthur, Progr. in Sol. State Chem. **10**, 157 (1975)
- [5] siehe z. B.: L. L. Chang, L. Esaki und R. Tsu, Appl. Phys. Lett. **24**, 593 (1974)
- [6] R. Dingle, W. Wiegmann und C. H. Henry, Phys. Rev. Lett. **33**, 827 (1974)
- [7] R. Dingle, H. L. Störmer, A. C. Gossard und W. Wiegmann, Appl. Phys. Lett. **33**, 665 (1978)
- [8] G. Abstreiter und K. Ploog, Phys. Rev. Lett. **42**, 1308 (1979)
- [9] D. Tsui et al., Phys. Rev. Lett. **48**, 1559 (1982)
- [10] B. J. van Wees et al., Phys. Rev. Lett. **60**, 848 (1988); D. A. Wharam et al., J. Phys. C **21**, L209 (1988)
- [11] G. Abstreiter et al., Phys. Rev. Lett. **54**, 2441 (1985)
- [12] L. Goldstein et al., Appl. Phys. Lett. **47**, 1099 (1985)
- [13] K. Brunner, G. Abstreiter et al., Phys. Rev. Lett. **73**, 1138 (1994)
- [14] siehe z. B.: A. Zrenner et al., Nature **418**, 612 (2002)
- [15] siehe z. B.: M. Kroutvar et al., Nature **432**, 81 (2004)
- [16] R. S. Wagner und W. C. Ellis, Appl. Phys. Lett. **4**, 89 (1964)
- [17] C. Colombo et al., Phys. Rev. B **77**, 155326 (2008); D. Spirkoska et al., Phys. Rev. B **80**, 245325 (2009)
- [18] Review: G. Koblmüller und G. Abstreiter, Phys. Status Solidi-RRL **8**, 11 (2014)
- [19] B. Mayer et al., Nature Com. **4**, 2931 (2013)

DER AUTOR

Gerhard Abstreiter hat an der TU München Physik studiert und promoviert. Nach einigen Jahren am MPI für Festkörperforschung in Stuttgart kehrte er zurück an die TUM und wurde 1987 Direktor des neu geschaffenen Walter-Schottky-Instituts. Im Laufe seiner sehr erfolgreichen Laufbahn hat er sich mit fast allen grundlegenden Eigenschaften von Halbleiterstrukturen und niederdimensionalen Elektronensystemen beschäftigt und weltweit anerkannte Pionierarbeit geleistet.



T. Kleinod / DPG